

О.М.Попович, канд.техн.наук, І.В.Головань, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: popovich1955@ukr.net

Наведено результати розробки та застосування математичної моделі еквівалентування квазітривимірної польової моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором коловою моделлю із двовимірними нелінійними залежностями параметрів схеми заміщення у функції ковзання та струмів. Даний підхід забезпечує ефективність математичного моделювання режимів роботи двигуна у складі електромеханічних систем з метою дослідження та проектування. Бібл. 3, табл. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, електромеханічна система, польова модель.

Шляхом підвищення енергоефективності асинхронних двигунів (АД) є застосування оптимальних конструктивних та режимних параметрів, які визначено при комплексному проектуванні АД із іншими складовими електромеханічних систем (ЕМС), до складу яких вони входять. Ефективність проектування обумовлюється адекватністю математичних моделей. Максимальну точність математичного моделювання забезпечують методи чисельного моделювання електромагнітного поля у машині, але потрібний для цього значний обсяг ресурсів ЕОМ часто унеможливує аналіз. У той же час, для задоволення практичних потреб дослідження та оптимального проектування АД у комплексі із іншими складовими ЕМС достатньою є колова математична модель АД за умови адекватного відображення властивостей машини зміною величини її електромагнітних параметрів. Результати побудови та дослідження такої колової моделі, яка за точністю аналізу еквівалентна польовій, представлена у даній роботі.

Потрібні залежності зміни параметрів схеми заміщення із забезпеченням точності польових методів визначаються за результатами серії чисельних розрахунків характеристик електромагнітного поля АД у двовимірній постановці задачі. При цьому використовується модель розрахунку комплексу векторного магнітного потенціалу \dot{A} при струмах, що є перпендикулярними площині аналізу із врахуванням наведених струмів у провідниках ротора. За заданими геометрією магнітопроводів і нелінійними властивостями електротехнічних матеріалів із варіюванням величин ковзання і комплексів фазних струмів статора виконується польовий аналіз у площині листів магнітопроводу із взаємно нерухомим осердям статора і ротора. Області струмів статора у розрахунковій моделі задано за їхнім відомим розподілом за пазами за умови, що просторова вісь x співпадає із віссю котушкової сторони фази A із позитивним напрямком струму. Це забезпечує наявність лише дійсної складової у комплексі струму статора \dot{I}_s . Потрібна частота струмів ротора забезпечується відповідною частотою струмів статора, які створюють кругове обертове поле. Задавання реального розподілу струмів статора призводить до несинусоїдності просторового розподілу магнітного поля. Оскільки ротор у розрахунковій моделі нерухомий, поля усіх просторових гармонік МРС наводять у ньому струми однакової частоти. Для врахування зміни впливу гармонік МРС із зміною швидкості ротора польовий аналіз проводиться окремо за кожною гармонікою. Для визначення параметрів схеми заміщення за гармонікою ν (за її основним полем $x_{m\nu}$ і для ротора за пазовою частиною з урахуванням зигзаг-розсіювання $r'_{2\nu}, x'_{2\nu}$) розроблено розрахункові моделі польового аналізу із розподілом струмів статора за пазами, який відповідає синусній обмотці відповідної полусності.

Польовий аналіз у площині осі вала ротора дозволяє визначити параметри схеми заміщення для лобової частини ротора $r'_{2\nu}, x'_{2\nu}$. При цьому площина аналізу проходить крізь вісь зубців ротора. Для врахування зміни просторового розподілу струмів кілець ротора із частотою як джерелом поля прийнято градієнт електричного потенціалу. Для кожної заданої частоти струму ротора у функції модуля струму кільця визначаються залежності зміни у ньому втрат активної потужності і співвідношення між активною і реактивною складовими комплексу струму.

Для визначення за результатами польового аналізу величини параметрів схеми заміщення з урахуванням впливу скосу пазів ротора використаємо наступні вирази [2]:

$$x_m = \frac{-P_{ec}}{3sI_s I_r}; \quad x'_2 = x'_{2n} + x'_{2sk}; \quad r'_2 = r'_{2n} + r'_{2n} = \frac{P_{ek}}{3|\dot{I}'_r|^2} + \frac{P_{ec}}{3|\dot{I}'_r|^2} \left(1 + \frac{h_{sk}^2}{l_\delta^2}\right); \quad x'_{2sk} = x_m \left(\frac{1}{k_{sk}^2} - 1\right);$$

$$x_{1no} = \frac{\omega_0 \operatorname{Re}(\dot{\Psi}_s)}{\sqrt{2}I_s} - x_m \left(1 + \frac{I_r^R}{I_s}\right); \quad x'_{2n} = x'_{2n} + x'_{2n} = \frac{P_{ek} \operatorname{tg}\varphi_k}{3s|\dot{I}'_r|^2} - x_m \left(1 + \frac{I_r^R I_s}{|\dot{I}'_r|^2}\right) \left(1 + \frac{h_{sk}^2}{l_\delta^2}\right).$$

Опір розсіювання статора x_{lno} відповідає пазовому розсіюванню (з урахуванням зигзаг-розсіювання) та диференційному, яке обумовлено гармоніками МРС. Опір лобового розсіювання статора визначається за відомими методиками. Отримані вирази параметрів спираються на інтегральні результати польового аналізу

$$\dot{\Psi}_i = \frac{2l_\delta W_s}{S_i} \int_{si} \dot{A} ds; \quad P_{ec} = l_\delta \sum_{i=1}^{z_2} \left(\int_{sci} \frac{J_{mi}^2}{2\gamma_{c2}} ds \right); \quad \dot{I}_{ci} = 0.5\sqrt{2} \int_{sci} \dot{J}_{mi} ds; \quad \dot{I}'_r = \sum_{i=1}^{z_2} \frac{\dot{I}_{ci} e^{j(i-1)p\delta_k}}{6W_s K_{ob}};$$

$$P_{ek} = 2\pi(2R_r - b_k) \int_{sk} \frac{J_{mk}^2}{2\gamma_{c2}} ds; \quad \dot{I}_{yk} = 0.5\sqrt{2} \int_{sk} \dot{J}_{mk} ds; \quad \text{tg}\varphi_k = \left| \frac{\dot{I}'_{yk}}{\dot{I}_{yk}} \right|,$$

де $\dot{\Psi}_s$ – перша симетрична складова амплітудних значень часових комплексів повних потокозчеплень фаз статора $\dot{\Psi}_i$, ($i=A,B,C$), які визначено за розрахунковою моделлю із обмоткою статора, що досліджується; P_{ec} , P_{ek} – потужності електричних втрат у стрижнях ротора та у обох кільцях ротора; \dot{I}_{ci} , \dot{I}_{yk} – діючі значення часових комплексів струмів усіх стрижнів ротора ($i=1, \dots, z_2$) та повного струму ділянки кільця, які визначено інтегруванням за площею провідника $sci(sk)$ густини струму \dot{J}_m ; \dot{I}'_r, I_r^R, I_r^I – комплекс струму ротора за робочою гармонікою з кількістю пар полюсів p , зведеного до статора, його дійсна та уявна складові (вираз визначення \dot{I}'_r відповідає випадку суміщення осі першого стрижня з віссю x); $\text{tg}\varphi_k$ – тангенс кута відставання струму кільця ротора порівняно із напругою; s – ковзання; γ_{c2} – питома провідність матеріалу обмотки ротора; R_r , b_k – зовнішній радіус та радіальний розмір кільця ротора; h_{sk} , k_{sk} – величина та коефіцієнт скосу; l_δ – розрахункова довжина повітряного проміжку; K_{ob} , W_s , S – обмотковий коефіцієнт, кількість витків фази статора та площа, яку займає одна їхня сторона; $\delta_k = 2\pi/z_2$ – кут між сусідніми стрижнями.

Для визначення залежностей зміни параметрів заступної схеми АД треба побудувати наступні розрахункові моделі для польового аналізу: у площині осі вала ротора; у площині листів магнітопроводу із реальним розподілом струмів статора за пазами і з синусною обмоткою для кожної гармоніки МРС, яка враховується. Послідовність аналізу складається з етапів: 1) визначення масиву частот обертання ротора і діапазону зміни струмів; 2) для обраних величин частот проведення польового аналізу у площині осі вала із визначенням залежностей величин втрат у кільці і тангенсу аргументу комплексу струму від модуля струму кільця; 3) для тих самих частот проведення польового аналізу у площині листів магнітопроводу із синусним розподілом струмів за кожною з гармонік МРС і визначення x_{mv} , r'_{2n} , x'_{2n} , а за відомим співвідношенням струмів стрижня і кільця і за результатами попереднього пункту алгоритму – r'_{2n} , x'_{2n} ; 4) за кожною гармонікою формування сімейства одновимірних залежностей (із ковзанням як параметру сімейства) індуктивного опору за основним полем у функції сумарної МРС машини, роторних параметрів у функції струму ротора; 5) для обраних частот проведення польового аналізу у площині листів магнітопроводу із реальним розподілом струмів статора за пазами, визначення потокозчеплень, струмів; 6) із використанням результатів четвертого пункту формування залежностей опору розсіювання статора у функції його струму; 7) формування двовимірних залежностей параметрів схеми заміщення.

Отримані двовимірні залежності зміни параметрів схеми заміщення дозволяють досліджувати режими роботи АД коловими методами. Із використанням математичної моделі АД електромехатронної системи [3] проведено дослідження моментів і струмів пускових та номінальних режимів двигунів 4A80A2/4A80A4 і їхнє співставлення з результатами розрахунку за довідниковими параметрами (для режимів номінального і короткого замикання), а також із даними каталогу [1]. Результати зведено до таблиці.

Режим роботи		Момент		Струм статора		
		Нм	Відхилення від каталогових даних, %	А	Відхилення від каталогових даних, %	
номінальний режим	розрахунок	каталогові дані	5.0/7.403	-	3.3/2.74	-
		номінальні параметри (за довідником)	5.12/7.475	2.4/1.18	3.01/2.597	8.8/5.32
		змінні параметри (за польовим аналізом)	5.11/7.456	2.2/0.7	3.112/2.641	6/3.72
пусковий режим	розрахунок	каталогові дані	10.5/14.806	-	21.5/13.71	-
		номінальні параметри (за довідником)	9.6/10.31	8.6/30.37	18.45/11.07	14.2/19.26
		пускові параметри (за довідником)	12.45/14.47	18.6/2.27	20.07/12.46	3.7/9.12
		змінні параметри (за польовим аналізом)	10.37/13.96	1.2/5.71	19.3/12.38	10.23/9.7

Для коректності порівняння з довідниковими параметрами аналіз виконано при однакових припущеннях: відсутність втрат у сталі і струмів ротора за вищими гармоніками МРС. Порівняння показує, що використання параметрів схеми заміщення за польовим аналізом забезпечує високу точність розрахунків у всьому діапазоні зміни ковзання. У номінальних режимах точність вища, ніж за розрахунком за довідниковими параметрами, а у пускових – на їхньому рівні. Поглиблений аналіз з урахуванням втрат у сталі, механічних і гармонік МРС показує суттєве наближення розрахункових даних до каталогових у всіх режимах.

Висновки. Розроблена математична модель еквівалентування квазітривимірної польової моделі АД коловою моделлю з нелінійними параметрами схеми заміщення забезпечує високу точність розрахунків із зміною ковзання у широкому діапазоні, не потребує емпіричних коефіцієнтів для визначення параметрів, придатна для дослідження довільної структури магнітопроводів і схем обмоток, розрахунку з урахуванням впливу масивних елементів магнітопроводу у пазовій і торцевій областях.

1. *Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А.* Асинхронные двигатели серии 4А. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
2. *Попович О.М., Головань І.В.* Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їхніх нелінійних залежностей за результатами польового аналізу // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2012. – Вип. 31. – С. 38 – 48.
3. *Попович О.М.* Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 89 – 97.

УДК 621.313

УТОЧНЕНИЕ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕМ ИХ ПОЛЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ЦЕПНЫМИ

А.Н.Попович, канд.техн.наук, **И.В.Головань**, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

E-mail: popovich1955@ukr.net

Приведены результаты разработки и использования математической модели эквивалентирования квазитрехмерной полевой модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором цепной моделью с двумерными нелинейными зависимостями параметров схемы замещения в функции скольжения и токов. Такой подход обеспечивает эффективность математического моделирования режимов работы двигателя в составе электро-механических систем для целей исследования и проектирования. Библи. 3, табл. 1.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электромеханическая система, полевая модель.

REFINEMENT OF ANALYSIS OPERATION OF INDUCTION MOTORS AS PART ELECTROMECHANICAL SYSTEMS USING EQUIVALENTING FIELD MODELS USING ELECTRICAL CIRCUITS

O.M.Popovych, I.V.Golovan

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: popovich1955@ukr.net

Shows the results the development and use of mathematical models to simplify a 3D field model induction squirrel-cage motor chain model with two-dimensional nonlinear dependencies equivalent circuit parameters as a function of slip and currents. This approach ensures the effectiveness of modeling of the engine as part of electromechanical systems for the purposes of research and design. References 3, table 1.

Key words: induction motor, electromechanical system, field model.

1. *Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaia E.A.* Induction motors 4A series. – Moskva: Energoatomizdat, 1982. – 504 p.(Rus)
2. *Popovych O.M., Golovan I.V.* Determination of equivalent circuit parameters of the induction motor and non-linear functions for field analysis results // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2012. – № 31. – Pp. 38–48. (Ukr)
3. *Popovych O.M.* Mathematical model of induction motor elektro-mechatronics system for simulation and structural modeling // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – № 25. – Pp. 89–97. (Ukr)

Надійшла 20.02.2014